

DOI: 10.20103/j.stxb.202211153300

肖集泓, 赖敏英, 李媚, 王春晓, 钟址非, 温清燕, 钱志军, 罗真, 王迎雪, 邓清雅, 邓传远. 宁德三都澳海岛马尾松林群落特征及物种多样性. 生态学报, 2023, 43(23): 9827-9843.

Xiao J H, Lai M Y, Li M, Wang C X, Zhong Z F, Wen Q Y, Qian Z J, Luo Z, Wang Y X, Deng Q Y, Deng C Y. Characteristics of *Pinus massoniana* forest community and species diversity of island in Sandu Gulf, Ningde, Fujian Province. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(23): 9827-9843.

宁德三都澳海岛马尾松林群落特征及物种多样性

肖集泓, 赖敏英, 李媚, 王春晓, 钟址非, 温清燕, 钱志军, 罗真, 王迎雪, 邓清雅, 邓传远*

福建农林大学风景园林与艺术学院, 福州 350002

摘要: 海岛人工林建设有利于减弱和消除海岛生态脆弱性, 但目前单一的人工林群落结构存在较多的缺点, 选用的植被也存在不适应海岛环境的问题。通过样方法对宁德三都澳 6 个海岛的马尾松 (*Pinus massoniana*) 半自然林的植被类型、物种组成、植物功能性状、物种多样性进行分析, 并利用冗余分析法分析物种多样性与环境因子的相关性, 旨在了解其演替状况, 群落结构特征和物种组成, 及其物种多样性与环境因子的相关关系, 丰富当地植被基础资料, 同时为海岛人工林建设、植被修复选择及当地马尾松林的合理经营和管理提供理论基础。结果表明: (1) 40 个样方共记录维管束植物 86 科 168 属 255 种 (含 5 变种), 在生活型谱上, 以乔木 (37.25%) 和灌木 (30.20%) 植物种类最多, 高位芽植物 (83.92%) 占比显著, 对光耐受性以中性植物 (69.02%) 为主。(2) 通过组平均聚类法将研究区植被划分为 5 类群系 33 类群丛, 分属于常绿针阔混交林和常绿针叶林 2 种植被型。(3) 常绿针阔混交林的多样性指数显著 ($P < 0.05$) 高于常绿针叶林, 但受林分郁闭度的影响, 马尾松+杨桐 (*Adinandra millettii*) 林灌木层多样性指数明显偏低。(4) 灌木层是马尾松林中的绝对优势层片, 多样性指数 (除 Pielou 指数外) 均显著 ($P < 0.05$) 高于乔木层和草本层。草本层受芒萁化感作用的影响, 多样性指数明显偏低。(5) 冗余分析法 (RDA) 分析结果表明, 土壤 pH 和速效钾显著 ($P < 0.05$) 影响群落的物种多样性指数, 两者对物种多样性的总解释量为 27.6%。(6) 灌木层鹅掌柴重要值与群落郁闭度之间存在显著 ($P < 0.05$) 的二次函数关系。

关键词: 三都澳; 海岛; 马尾松; 群落特征; 物种多样性; 冗余分析

Characteristics of *Pinus massoniana* forest community and species diversity of island in Sandu Gulf, Ningde, Fujian Province

XIAO Jihong, LAI Minying, LI Mei, WANG Chunxiao, ZHONG Zhifei, WEN Qingyan, QIAN Zhijun, LUO Zhen, WANG Yingxue, DENG Qingya, DENG Chuanyuan*

College of Landscape Architecture and the Arts, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Abstract: The construction of plantation forest in island is conducive to weakening and eliminating the ecological vulnerability of the island. However, there are many shortcomings in the currently single plantation forest community structure, and the selected vegetation also has the problem of not adapting to the island environment. In this study, the vegetation types, species composition, plant functional traits, and species diversity of *Pinus massoniana* semi-natural forests in six islands of Sandu Gulf of Ningde were analyzed by sample method, and the correlation between species diversity and environmental factors was analyzed by redundancy analysis (RDA). The aim is to understand the succession status, community structure characteristics, species composition, and the correlation between species diversity and environmental

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目 (201505009); 福建省区域发展科技项目计划 (2018Y3006); 福建农林大学科技创新专项基金项目 (CXZX2019086)

收稿日期: 2022-11-15; **网络出版日期:** 2023-08-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dengchuanyuan@fafu.edu.cn

factors, enrich the basic data of local vegetation, and provide a theoretical basis for the construction of island plantation, vegetation restoration selection, and rational management of local *Pinus massoniana* forests. The results showed that: (1) a total of 255 species (including 5 varieties) of vascular plants belonging to 168 genera and 86 families were recorded in 40 quadrats. In the life form spectrum, arbor and shrub species were the most, accounting for 37.25% and 30.20% of the total number of species, respectively. Phanerophytes accounted for a significant proportion, accounting for 83.92%. The light tolerance of neutral plants was dominant, accounting for 69.02%. (2) The vegetation in the study area was divided into 5 groups and 33 associations by group average clustering method, which belonged to 2 vegetation types of evergreen coniferous and broad-leaved mixed forest and evergreen coniferous forest. (3) The diversity index of evergreen coniferous and broad-leaved mixed forest was significantly ($P < 0.05$) higher than that of evergreen coniferous forest, but the diversity index of shrub layer in *Pinus massoniana* + *Adinandra millettii* forest was significantly lower due to the influence of canopy density. (4) Shrub layer was the dominant layer in *Pinus massoniana* forest, and the diversity index (except Pielou index) was significantly ($P < 0.05$) higher than that of arbor layer and herb layer. The herbaceous layer was affected by allelopathy of *Dicranopteris pedata*, and the diversity index was obviously lower. (5) The results of redundancy analysis showed that soil pH and available potassium significantly ($P < 0.05$) affected the species diversity index of the community. The two soil factors accounted for 27.6% of the species diversity, but there were 72.4% unknown factors. (6) There was a significant ($P < 0.05$) quadratic function relationship between the importance value of *Schefflera octophylla* in shrub layer and crown density.

Key Words: Sandu Gulf; island; *Pinus massoniana*; community characteristics; species diversity; redundancy analysis

因地理位置特殊,海岛常年风速较大,受台风浪潮侵袭,土壤瘠薄盐分含量高,且因规模有限和空间隔离,海岛生态系统具有明显的独立性与资源短缺性,属于典型的脆弱型生态系统,在独特的自身环境与复杂的干扰下,表现出易受损性和难恢复性^[1]。森林生态系统作为组成结构复杂且物种资源最为丰富的生态系统类型,不仅提供了重要的自然资源,而且对保护脆弱的生态系统具有重要的意义。大量的原始天然林被破坏后,许多海岛通过人工林种植和生态保护政策管理等人为调控方式进行植被重建和修复,并借此减弱和消除海岛生态脆弱性^[1-3]。海岛人工林多以单一树种进行种植建设。单一树种种植的人工林群落结构简单,抵抗病虫害和自然灾害的能力较弱,林下植被和其他地被植物及微生物等相对缺乏,因此常表现出林分物种多样性极低,森林群落生态服务功能性差,地被植物及地表枯落物少,土壤养分等肥力较低,保持水土及涵养水源等方面能力极弱等缺点^[2-4]。且目前仍然缺乏相关技术和研究资料以支撑我国海岛植被修复,导致野生植物资源衰退严重,修复选用的物种也因不适应海岛或群落的环境而被淘汰^[5]。因此,对相对稳定的海岛半自然林进行相关研究,不仅能够丰富海岛植物资料,了解人工林向自然林演替过程中植物组成和变动,同时能够了解演替过程、植被稳定性、群落多样性等特点,及了解限制群落演替进程的各种影响因子,这对海岛生态和植被的修复等具有十分重要的指导意义。

群落的结构特征和物种多样性是生态学研究的热点之一^[6]。目前,国内外学者多集中于对内陆和外海岛的植被进行研究^[7-10],对内海岛的相关研究较为缺乏。三都澳海岛属内海岛屿,该区域也是南亚热带和中亚热带的过渡区域,地理位置十分重要,但目前对于该区域植物研究仅见对苔藓植物多样性的调查^[11]。马尾松(*Pinus massoniana*)是松科(Pinaceae)松属常绿针叶大乔木,适应性强,耐干旱瘠薄,是恢复退化土地的优秀先锋树种^[12]。马尾松因适应性强,在三都澳地区,特别是环境较内陆恶劣的海岛上广泛分布,占据着当地最大的森林面积,是当地最具代表性的森林类型,具有不可替代的生态价值。三都澳地区的马尾松林为上个世纪飞机撒播造林或人工造林形成,受当地政策的制约,人为影响相对较小,属于半自然群落。自然林的保护和恢复是目前我国实施的一项庞大而复杂的社会工程,自然林资源的合理开发和研究逐渐成为社会关注的热点问题^[4]。自然或半自然林林下植物丰富多样,伴随着群落的演替更新和植物的优胜劣汰,适合在群落中

生存的优势物种逐渐体现,共同构成了相对稳定的群落结构。因此,对三都澳半自然马尾松林进行群落特征和物种多样性研究,有利于了解其群落中的主要物种组成及相对稳定的群落结构特点,这对当前海岛植被修复及海岛人工林建设具有一定的指导意义。且当地的马尾松林存在植株老化死亡、自然更新困难等问题,其未来的持续经营和管理也亟需相关研究提供基础资料参考。因此本研究通过野外调查三都澳 6 个海岛的马尾松林,分析其物种组成和植物功能性状,同时划分其植被类型,探究其演替规律,并分析物种多样性及其与环境因子的相关性,旨在摸清三都澳海岛马尾松林群落特征、演替状况,及其物种多样性与环境因子的相关关系,丰富当地植被基础资料,弥补内海岛屿相关研究领域的空缺,为海岛植被修复、海岛人工林建设及当地马尾松林的合理经营和管理提供理论基础。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

三都澳位于福建省宁德市东南部,为中国 1.84 万 km 黄金海岸线的中点,距宁德市区 30 km,是世界级天然深水良港。共有岛屿 126 个,有居民岛屿 17 个,其中最大的岛屿是三都岛,总面积 29.3 km²,最高海拔 461 m,青山岛、长腰岛、白匏岛、鸡公山岛和斗帽岛面积分别为 9.48 km²、2.22 km²、1.12 km²、0.89 km²和 0.6 km²[11]。研究区属典型的亚热带海洋季风气候,地形以丘陵为主,土壤类型以红壤和黄壤为主,岛上以次生马尾松(*Pinus massoniana*)针叶林和马尾松针阔混交林分布最广。

1.2 样地设置与调查

基于实地踏查,于 2022 年 6—8 月采用典型选样的方法对三都岛、青山岛、长腰岛、鸡公山岛、白匏岛、斗帽岛 6 个面积较大和森林覆盖率较高的有居民海岛进行样地设置,6 个海岛分别设置有 20、6、5、4、3 和 2 个样地(图 1),共设置 40 个 20 m×20 m 的森林样方。以 20 m×20 m 作为乔木层样方面积,森林样方 4 个角设置 4 个面积为 5 m×5 m 的灌木样方,4 个角及中心位置设置 5 个面积为 1 m×1 m 的草本样方。记录乔木层(株高≥5 m 或胸径≥3 cm 的乔木、竹类、大型灌木、附生植物和藤本植物)、灌木层(株高<5 m 且胸径<3 cm 的灌木、攀援灌木、乔木幼树和竹类,统计时剔除以攀援状依附植物生长的攀援灌木植株)和草本层(含攀援草本和蕨类,统计时剔除以攀援状依附植物生长的攀援草本植株)每一棵植株的种名、胸径、株高、冠幅(或盖度)、数量等信息[13]。采用全球定位系统(GPS)和森林罗盘仪记录样方的经纬度、海拔、坡向、坡度和坡位。将坡位划分为上、中、下坡;坡向划分为阳坡(157.5°—247.5°)、半阳坡(112.5°—157.5°、247.5°—292.5°)、阴

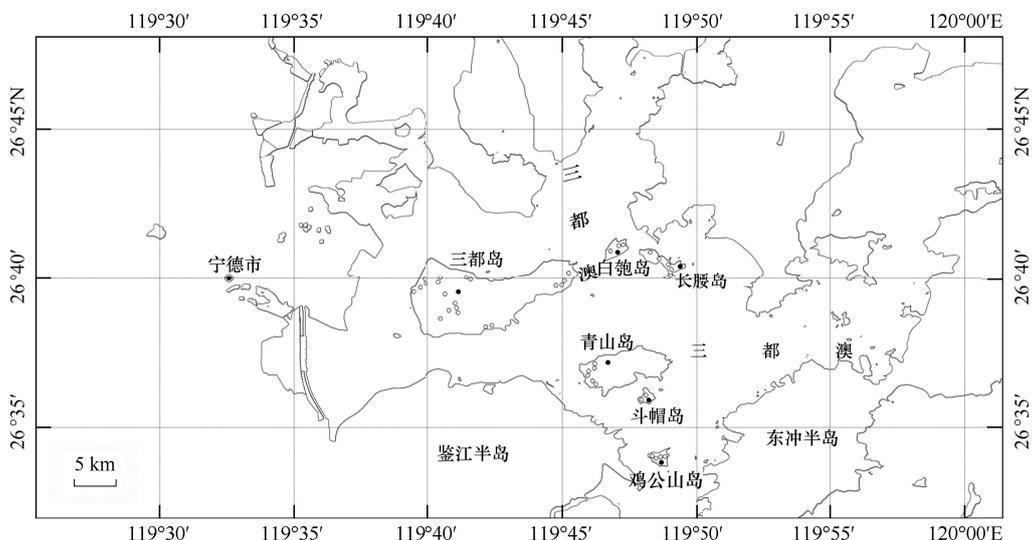


图 1 三都澳 6 个海岛区位

Fig.1 Locations of six islands in Sandu Gulf

坡(0° — 67.5° 、 337.5° — 360°)、半阴坡(67.5° — 112.5° 、 292.5° — 337.5°)^[14]。采用林冠数字图像 Photoshop 分析法^[15]测定群落郁闭度,样方基础信息见表 1。

表 1 样方概况

Table 1 General information of sampling square

样方号 Sample No.	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Elevation/m	坡向 Slope aspect	坡度 Slope/($^{\circ}$)	坡位 Slope position	郁闭度 Crown density
S1	119°40'47.66"	26°39'07.25"	42.4	东南 160	30	中	0.75
S2	119°40'47.12"	26°39'09.55"	81.1	东南 160	30	上	0.75
S3	119°39'33.26"	26°39'53.18"	178.4	北 353	30	上	0.80
S4	119°39'20.11"	26°39'51.20"	71.9	西北 312	30	中	0.75
S5	119°39'32.59"	26°39'57.99"	123.2	西 261	37	上	0.68
S6	119°40'22.00"	26°39'43.00"	175.5	东南 155	32	中	0.80
S7	119°40'16.47"	26°40'10.93"	40.7	西北 289	24	下	0.75
S8	119°40'10.60"	26°40'07.14"	96.0	东北 23	23	下	0.80
S9	119°44'53.67"	26°40'25.00"	126.0	西南 205	30	上	0.55
S10	119°44'35.47"	26°39'58.77"	157.2	南 180	30	上	0.93
S11	119°44'46.93"	26°40'00.68"	133.0	西南 191	30	中	0.95
S12	119°44'44.44"	26°39'59.58"	140.9	东北 47	30	中	0.90
S13	119°42'04.34"	26°38'33.02"	109.1	西南 224	28	下	0.60
S14	119°41'55.43"	26°38'29.77"	109.1	西南 197	35	下	0.60
S15	119°40'46.81"	26°39'11.85"	92.1	东南 119	26	中	0.80
S16	119°40'40.70"	26°39'06.44"	49.4	东南 151	32	下	0.65
S17	119°40'19.56"	26°38'53.23"	55.0	东南 115	22	下	0.60
S18	119°39'09.64"	26°39'46.10"	36.2	西北 294	22	下	0.58
S19	119°41'11.56"	26°40'14.92"	89.3	东北 39	27	下	0.88
S20	119°41'16.77"	26°40'12.60"	64.0	东北 35	30	下	0.85
Q1	119°45'49.49"	26°36'45.54"	83.2	西南 197	28	中	0.70
Q2	119°45'54.47"	26°36'44.06"	74.4	西南 212	26	中	0.80
Q3	119°45'49.49"	26°37'14.24"	160.7	西北 342	24	中	0.67
Q4	119°45'51.85"	26°37'19.87"	92.4	北 7	34	中	0.80
Q5	119°45'32.05"	26°37'02.60"	36.9	西南 219	34	下	0.80
Q6	119°45'33.29"	26°37'04.47"	58.1	西南 242	35	中	0.80
C1	119°48'34.85"	26°40'11.21"	26.0	西南 208	38	上	0.65
C2	119°48'43.84"	26°40'35.66"	49.2	南 175	36	中	0.95
C3	119°48'02.29"	26°41'07.33"	54.2	北 351	26	下	0.93
C4	119°48'20.11"	26°40'57.27"	56.6	东北 71	33	下	0.65
C5	119°48'43.16"	26°40'48.40"	16.2	东北 55	27	下	0.55
J1	119°48'24.42"	26°34'14.67"	104.7	东 88	37	上	0.70
J2	119°48'35.68"	26°34'15.09"	44.6	东 83	24	中	0.80
J3	119°48'08.40"	26°34'16.59"	47.7	东北 38	38	中	0.70
J4	119°47'59.29"	26°34'17.35"	19.3	北 3	28	下	0.78
B1	119°46'31.03"	26°41'06.06"	99.5	西南 225	34	上	0.68
B2	119°47'01.63"	26°41'23.15"	45.8	东南 127	22	上	0.75
B3	119°47'03.07"	26°41'23.62"	44.6	E83	24	中	0.80
D1	119°47'39.27"	26°36'09.74"	57.0	西北 282	31	上	0.85
D2	119°47'45.28"	26°36'15.55"	63.0	西北 291	23	下	0.75

S:三都岛 Sandu Island; Q:青山岛 Qingshan Island; C:长腰岛 Changyao Island; J:鸡公山岛 Jigongshan Island; B:白匏岛 Baipao Island; D:斗帽岛

Doumao Island

1.3 数据处理与分析

根据《中国植物志》^[16] (<http://www.iplant.cn/foc>) 和《福建植物志》^[17] 整理研究区植物名录, 记录分布区域, 并区分乡土植物和外来植物, 采用最新修订的拉丁名和中文名。由于亚热带地区群落结构和物种组成复杂, 应通过数量分类方法(聚类分析)进行植物群落分类^[13], 因此, 根据群落的物种重要值(剔除重要值<5的偶见种), 采用目前植物群落分类中较为常用的组平均聚类法^[9-10, 18]划分植物群落类型。利用冗余分析(RDA)解释环境因子对物种多样性的影响。利用二次函数拟合分析灌木层鹅掌柴(*Heptapleurum heptaphyllum*)与群落郁闭度的关系。重要值和物种多样性计算公式^[19-20]如下:

$$\text{重要值} = (\text{相对多度} + \text{相对频度} + \text{相对显著度}) / 3 \quad (1)$$

Shannon-Wiener 指数(H):

$$H = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i) \quad (2)$$

Simpson 指数(D):

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S (P_i)^2 \quad (3)$$

Pielou 指数(E):

$$E = \frac{H}{\ln S} \quad (4)$$

Patrick 指数(R):

$$R = S \quad (5)$$

式中, 各层片相对显著度分别采用乔木胸高(1.3 m 处)断面积和灌草层植物盖度计算。 S 为各样方中出现的物种数, N 为所有物种个数之和, $P_i = N_i / N$, N_i 为第 i 个物种的个体数($i = 1, 2, 3, \dots$)。

$$\text{群落多样性指数} = 0.5D_1 + 0.3D_2 + 0.2D_3 \quad (6)$$

式中, D_1 、 D_2 和 D_3 分别表示乔灌草 3 个层片的多样性指数^[9, 21]。利用 SPSS 软件的单因素方差分析计算各群系、各植被型的多样性指数, 同时选择最小显著性差异法(LSD)进行事后方差比较不同群系、及各层片之间的多样性指数差异水平, 由于植被型只有两种, 因此选择 t 检验进行多样性指数差异性水平分析。通过方差分析比较本研究地与平潭海岛^[9]森林植被物种多样性的差异。

采用五点取样法采集各样方 25 cm 深的土壤样品, 研磨过筛后重复 3 次测定其 9 项指标: pH 值、全钾、速效钾、全磷、有效磷、全氮、碱解氮、有机质和水溶性盐总量^[22], 土壤信息见表 2。

分析群落中种子植物的生长型、生活型、对光的耐受性 3 项定性功能性质, 具体划分依据为: 生长型分为乔木、灌木、草本、藤本; 生活型划分为 9 类, 即高位芽植物(含大型 >30 m、中型 8—30 m、小型 2—8 m 和矮小型 0.25—2 m 共 4 类)、地上芽、地面芽、藤本附生和一年生植物; 植物对光的耐受性分为阳性、中性和阴性^[9, 23]。

2 结果与分析

2.1 物种组成和植物功能性状

统计 40 个样方调查数据, 发现三都澳海岛马尾松群落内维管束植物共计 255 种(含 5 变种), 隶属于 86 科 168 属, 属种系数为 66.80%。其中以被子植物为主, 共计 72 科 150 属 231 种(含 5 变种), 蕨类植物 10 科 16 属 22 种, 裸子植物仅 2 科 2 属 2 种, 即马尾松和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)。研究区植物来源统计, 乡土植物 78 科 159 属 244 种, 外来植物 7 科 12 属 12 种, 其中含 1 级恶性入侵植物 2 种, 即钻叶紫菀(*Symphotrichum subulatum*)和小蓬草(*Erigeron canadensis*), 但在林中重要值占比很低。

表 2 土壤化学指标

Table 2 Chemical indicators of soil

样方号 Sample No.	pH	全钾 TK/ (g/kg)	速效钾 AK/ (mg/kg)	全磷 TP/ (g/kg)	有效磷 AP/ (mg/kg)	全氮 TN/ (g/kg)	碱解氮 AN/ (mg/kg)	有机质 SOM/ (g/kg)	水溶性 盐总量 S/(g/kg)
S1	4.55	1.17	73.71	0.09	2.31	1.03	172.12	31.48	1.36
S2	4.66	0.41	52.89	0.06	1.40	0.72	157.09	23.36	1.62
S3	4.65	4.71	76.73	0.19	1.33	1.47	119.25	38.39	0.97
S4	4.66	3.19	44.26	0.34	3.95	1.67	161.40	43.98	0.97
S5	4.64	3.19	51.64	0.10	1.55	0.74	141.96	20.99	1.51
S6	4.44	6.95	32.71	0.26	1.10	1.38	179.98	47.05	1.34
S7	4.41	4.78	91.24	0.21	1.43	1.84	224.79	48.87	1.78
S8	4.30	5.04	45.62	0.11	1.80	1.33	214.71	45.98	1.46
S9	4.36	9.84	45.62	0.10	0.96	1.24	163.96	48.45	1.81
S10	4.60	3.68	51.89	0.12	1.51	1.22	152.48	37.95	0.87
S11	4.61	3.16	74.07	0.16	0.92	1.31	167.87	41.78	0.49
S12	4.61	3.32	102.86	0.15	1.24	1.64	231.32	42.81	1.49
S13	4.62	7.14	84.01	0.16	1.35	0.96	140.50	39.87	1.02
S14	4.67	8.82	84.01	0.19	1.68	1.38	180.03	41.16	1.64
S15	4.49	3.69	112.70	0.17	1.12	1.65	148.91	41.20	1.37
S16	4.67	2.07	55.02	0.09	1.31	1.06	136.17	29.22	1.69
S17	4.45	2.05	74.81	0.11	3.17	0.87	178.88	22.06	0.82
S18	4.68	7.59	23.69	0.23	0.85	1.36	166.64	45.70	1.07
S19	4.44	6.70	44.71	0.19	1.02	1.79	192.54	52.85	1.22
S20	4.22	9.06	44.48	0.21	1.30	1.30	204.37	34.74	0.50
Q1	4.92	2.66	55.58	0.15	1.63	1.32	80.06	37.04	1.36
Q2	5.37	2.51	44.71	0.17	0.66	1.35	76.42	35.35	1.62
Q3	5.21	2.52	34.50	0.16	0.61	1.13	68.50	31.23	0.97
Q4	5.14	1.69	63.51	0.21	1.16	1.54	90.79	43.13	0.97
Q5	5.05	2.85	75.57	0.17	1.12	1.72	118.29	44.19	1.51
Q6	5.31	2.61	53.93	0.14	0.78	1.04	84.51	31.23	1.34
C1	5.96	2.38	42.18	0.27	1.46	1.06	76.42	33.10	1.78
C2	4.82	3.04	93.48	0.19	0.64	1.01	102.75	37.69	1.46
C3	4.17	8.28	45.16	0.26	1.99	2.08	196.67	48.30	1.81
C4	4.32	9.71	35.56	0.22	2.21	1.46	164.10	64.02	0.87
C5	4.58	2.82	93.48	0.17	1.08	1.57	120.43	46.56	0.49
J1	4.66	3.81	126.26	0.28	1.62	2.10	250.19	54.73	1.49
J2	4.57	4.76	63.82	0.19	0.97	1.36	419.77	44.18	1.02
J3	4.37	4.80	44.48	0.18	0.98	1.24	135.82	50.28	1.64
J4	5.05	2.46	72.28	0.31	1.25	1.12	111.29	41.06	1.37
B1	4.82	2.69	74.44	0.17	1.86	1.51	126.13	49.71	1.69
B2	4.81	2.90	56.15	0.18	1.36	1.38	179.45	41.10	0.82
B3	5.00	4.43	145.07	0.22	1.36	2.20	205.19	65.73	1.07
D1	5.01	3.68	90.37	0.22	1.09	1.70	143.80	54.99	1.22
D2	4.82	4.71	118.48	0.21	0.69	1.38	147.95	44.92	0.50

TK:全钾 Total potassium;AK:速效钾 Available potassium;TP:全磷 Total phosphorus;AP:有效磷 Available phosphorus;TN:全氮 Total nitrogen;AN:碱解氮 Alkali-hydrolyzed nitrogen;SOM:有机质 Soil organic matter;S:水溶性盐总量 Total amount water-soluble salt

对 255 种维管束植物的 3 个定性功能性状进行统计分析(见表 3)。由表 3 可知,在生长型上,以乔木和灌木植物种类最多,分别占总物种数的 37.25% 和 30.20%;在对光的耐受性上,以中性植物数量最多,占总物

种数的 69.02%, 其中阳性树种都为木本植物; 在生活型上, 以小型、矮小型和中型高位芽植物为主, 分别占总物种数的 29.80%、27.84% 和 24.71%, 大型高位芽植物和一年生植物占比极小, 分别占比 1.57% 和 2.35%。

表 3 三都澳 6 个海岛马尾松群落维管束植物功能性状统计

Table 3 Statistics of vascular plants functional traits of *Pinus massoniana* community in 6 islands in Sandu Gulf

功能性状 Functional traits	类别 Style	物种数(比例) Species number (Percentage/%)	功能性状 Functional traits	类别 Style	物种数(比例) Species number (Percentage/%)
生长型 Growth form	乔木	95 (37.25)	生活型 Life form	大型高位芽植物	4 (1.57)
	灌木	77 (30.20)		中型高位芽植物	63 (24.71)
	草本	62 (24.31)		小型高位芽植物	76 (29.80)
	藤本	21 (8.24)		矮小型高位芽植物	71 (27.84)
对光的耐受性 Tolerance to light	阳性	41 (16.08)		地上芽植物	6 (2.35)
	中性	176 (69.02)		隐芽植物	7 (2.75)
	阴性	38 (14.90)		藤本附生植物	22 (8.63)
				一年生植物	6 (2.35)

2.2 植物群落类型划分

参照《<中国植被志>研编内容与规范》有关植被分类原则和群落命名原则^[13], 选取 40 个样方中重要值 > 5% 的物种, 利用组平均聚类法对各个样方的物种重要值进行聚类分析(图 2)。由图 2 可知, 当欧氏距离为 20 时, 由上至下将三都澳 6 个海岛的马尾松群落划分为 5 类群系: 马尾松林、马尾松+欆木 (*Loropetalum chinense*) 林、马尾松+鹅掌柴林、马尾松+杨桐 (*Adinandra millettii*) 林、马尾松+茶竿竹 (*Pseudosasa amabilis*) 林, 最终划分为 33 类群丛(见表 4)。统计 40 个样方各层片重要值占比最大的优势种重要值和数量(见表 5), 由表 5 可知, 40 个样方的乔木层优势种均为马尾松, 灌木层优势种主要有: 鹅掌柴、杨桐、九节 (*Psychotria asiatica*)、桃金娘 (*Rhodomyrtus tomentosa*)、玉叶金花 (*Mussaenda pubescens*)、豺皮樟 (*Litsea rotundifolia* var. *oblongifolia*) 等, 草本层最主要优势种为芒萁 (*Dicranopteris pedata*), 此外还有团叶鳞始蕨 (*Lindsaea orbiculata*)、扇叶铁线蕨 (*Adiantum flabellulatum*)、狗脊 (*Woodwardia japonica*) 等优势种。

2.3 植物群落物种多样性与环境因子的相关性

根据调查数据计算 40 个样方各层片及群落整体的物种多样性指数(包括 Patrick 指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数), 见表 5。由表 5 可知, 在群落各层片上, 灌木层的物种多样性指数均远高于同样方的乔木层和草本层。对不同群系、植被型的样方进行多样性指数统计计算, 并标记显著性差异(见表 6、表 7)。由表 6、表 7 和方差分析及 *t* 检验结果可知, 5 类群系和 2 种植被型的灌木层多样性指数(除 *E* 外)

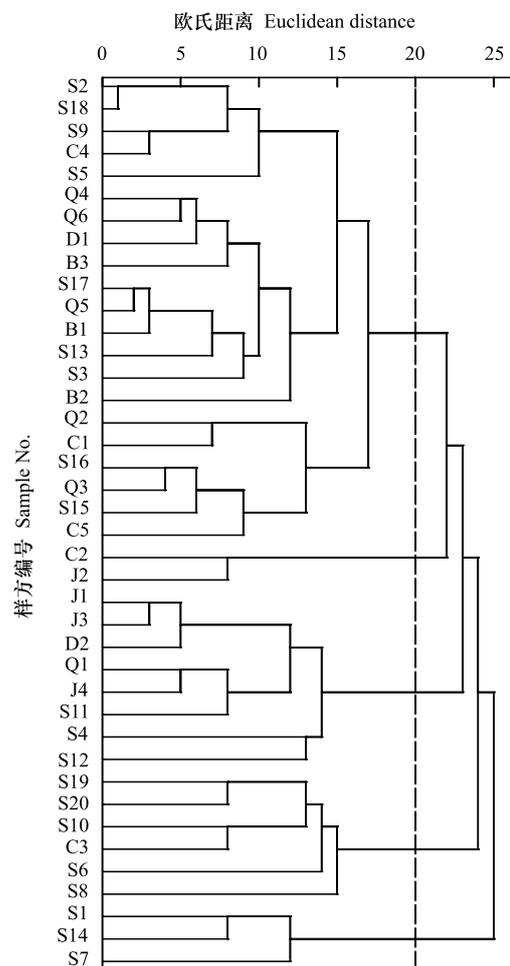


图 2 植物群落组平均聚类

Fig.2 The clustering tree group-average strategy

均显著 ($P < 0.05$) 高于乔木层和草本层, 表明研究地群落以灌木层物种最丰富、群落最稳定、结构最复杂。从植被型差异来看, 马尾松常绿阔混交林仅乔木层 D 和群落整体 E 显著 ($P < 0.05$) 高于马尾松常绿针叶林, 其他指数差异不显著 ($P > 0.05$)。从群系差异来看, 5 类群系乔木层多样性指数差异均不显著 ($P > 0.05$), II 群系的灌木层 R 显著 ($P < 0.05$) 低于其他 4 类群系, I 群系的草本层 R 显著 ($P < 0.05$) 高于其他群系, II 群系的草本层 H 、 D 、 R 均显著 ($P < 0.05$) 低于其他 4 类群系, II 群系的群落整体 H 、 D 、 R 显著 ($P < 0.05$) 低于其他 3 类混交林群系, V 群系的群落整体 H 、 D 均显著 ($P < 0.05$) 低于除 II 外的其他混交林群系。

表 4 三都澳 6 个海岛马尾松群落植被类型

Table 4 Vegetation types of *Pinus massoniana* community in 6 islands in Sandu Gulf

植被型 Vegetation types	群系 Formations	群丛 Associations	样方 Quadrat
i	I	马尾松+鹅掌柴-马甲菝葜-青绿藁草 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Heptapleurum heptaphyllum</i> - <i>Smilax lanceifolia</i> - <i>Carex breviculmis</i>	S12
		马尾松+鹅掌柴-九节+鹅掌柴-芒萁 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Heptapleurum heptaphyllum</i> - <i>Psychotria asiatica</i> + <i>Heptapleurum heptaphyllum</i> - <i>Dicranopteris pedata</i>	S4
		马尾松+鹅掌柴-豺皮樟-扇叶铁线蕨+狗脊 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Heptapleurum heptaphyllum</i> - <i>Litsea rotundifolia</i> var. <i>oblongifolia</i> - <i>Adiantum flabellulatum</i> + <i>Woodwardia japonica</i>	S11
		马尾松+鹅掌柴-豺皮樟+榿木-芒萁 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Heptapleurum heptaphyllum</i> - <i>Litsea rotundifolia</i> var. <i>oblongifolia</i> + <i>Loropetalum chinense</i> - <i>Dicranopteris pedata</i>	Q1
		马尾松+鹅掌柴-鹅掌柴+豺皮樟-团叶鳞始蕨+扇叶铁线蕨 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Heptapleurum heptaphyllum</i> - <i>Heptapleurum heptaphyllum</i> + <i>Litsea rotundifolia</i> var. <i>oblongifolia</i> - <i>Lindsaea orbiculata</i> + <i>Adiantum flabellulatum</i>	J4
		马尾松+鹅掌柴-鹅掌柴+玉叶金花-芒+扇叶铁线蕨 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Heptapleurum heptaphyllum</i> - <i>Heptapleurum heptaphyllum</i> + <i>Mussaenda pubescens</i> - <i>Miscanthus sinensis</i> + <i>Adiantum flabellulatum</i>	D2
		马尾松+鹅掌柴-鹅掌柴+玉叶金花-芒萁 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Heptapleurum heptaphyllum</i> - <i>Heptapleurum heptaphyllum</i> + <i>Mussaenda pubescens</i> - <i>Dicranopteris pedata</i>	J1、J3
	II	马尾松+杨桐-流苏子+桃金娘-芒萁 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Adinandra millettii</i> - <i>Coptosapelta diffusa</i> + <i>Rhodomyrtus tomentosa</i> - <i>Dicranopteris pedata</i>	S8
		马尾松+杨桐-桃金娘+杨桐-芒萁 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Adinandra millettii</i> - <i>Rhodomyrtus tomentosa</i> + <i>Adinandra millettii</i> - <i>Dicranopteris pedata</i>	S6
		马尾松+杨桐-秤星树+三桠苦-芒萁 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Adinandra millettii</i> - <i>Ilex asprella</i> + <i>Melicope pteleifolia</i> - <i>Dicranopteris pedata</i>	S10
		马尾松+杨桐-红鳞蒲桃-芒萁 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Adinandra millettii</i> - <i>Syzygium hancei</i> - <i>Dicranopteris pedata</i>	C3
		马尾松+杨桐-豺皮樟-芒萁 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Adinandra millettii</i> - <i>Litsea rotundifolia</i> var. <i>oblongifolia</i> - <i>Dicranopteris pedata</i>	S19、S20
		马尾松+茶竿竹-茶竿竹+豺皮樟-芒萁 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Pseudosasa amabilis</i> - <i>Pseudosasa amabilis</i> + <i>Litsea rotundifolia</i> var. <i>oblongifolia</i> - <i>Dicranopteris pedata</i>	S7
	III	马尾松+茶竿竹-椴子+山矾-芒萁 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Pseudosasa amabilis</i> - <i>Gardenia jasminoides</i> + <i>Symplocos sumuntia</i> - <i>Dicranopteris pedata</i>	S1
		马尾松+茶竿竹-玉叶金花-芒萁 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Pseudosasa amabilis</i> - <i>Mussaenda pubescens</i> - <i>Dicranopteris pedata</i>	S14
		马尾松+榿木-榿木+杨桐-芒萁 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Loropetalum chinense</i> - <i>Loropetalum chinense</i> + <i>Adinandra millettii</i> - <i>Dicranopteris pedata</i>	C2
	IV	马尾松+榿木-榿木+鹅掌柴-芒+韩信草 <i>Pinus massoniana</i> + <i>Loropetalum chinense</i> - <i>Loropetalum chinense</i> + <i>Heptapleurum heptaphyllum</i> - <i>Miscanthus sinensis</i> + <i>Scutellaria indica</i>	J2
		V	马尾松-豺皮樟+桃金娘-芒萁 <i>Pinus massoniana</i> - <i>Litsea rotundifolia</i> var. <i>oblongifolia</i> + <i>Rhodomyrtus tomentosa</i> - <i>Dicranopteris pedata</i>
	ii		

续表

植被型 Vegetation types	群系 Formations	群丛 Associations	样方 Quadrat
		马尾松-玉叶金花+鹅掌柴-芒萁 <i>Pinus massoniana-Mussaenda pubescens + Heptapleurum heptaphyllum-Dicranopteris pedata</i>	B2
		马尾松-鹅掌柴+山矾-狗脊+扇叶铁线蕨 <i>Pinus massoniana-Heptapleurum heptaphyllum+Symplocos sumuntia-Woodwardia japonica+Adiantum flabellulatum</i>	S3
		马尾松-九节+山矾-淡竹叶+芒萁 <i>Pinus massoniana-Psychotria asiatica+Symplocos sumuntia-Lophatherum gracile+Dicranopteris pedata</i>	S13
		马尾松-九节+鹅掌柴-黑莎草+山麦冬 <i>Pinus massoniana-Psychotria asiatica + Heptapleurum heptaphyllum-Gahnia. tristis+Liriope spicata</i>	B1
		马尾松-九节+鹅掌柴-青绿藁草+扇叶铁线蕨 <i>Pinus massoniana-Psychotria asiatica+ Heptapleurum heptaphyllum-Carex breviculmis+Adiantum flabellulatum</i>	S17、Q5
		马尾松-鹅掌柴+九节-团叶鳞始蕨 <i>Pinus massoniana-Heptapleurum heptaphyllum + Psychotria asiatica-Lindsaea orbiculata</i>	B3
		马尾松-鹅掌柴-山麦冬+团叶鳞始蕨 <i>Pinus massoniana-Heptapleurum heptaphyllum-Liriope spicata+Lindsaea orbiculata</i>	D1
		马尾松-鹅掌柴-芒萁 <i>Pinus massoniana-Heptapleurum heptaphyllum-Dicranopteris pedata</i>	Q4、Q6
		马尾松-印度野牡丹+樫木-芒萁 <i>Pinus massoniana-Melastoma malabathricum + Loropetalum chinense-Dicranopteris pedata</i>	C5
		马尾松-玉叶金花+菝葜-芒萁 <i>Pinus massoniana-Mussaenda pubescens+Smilax china-Dicranopteris pedata</i>	S15
		马尾松-印度野牡丹+菝葜-扇叶铁线蕨+青绿藁草 <i>Pinus massoniana-Melastoma malabathricum+Smilax china-Adiantum flabellulatum+Carex breviculmis</i>	S16
		马尾松-印度野牡丹-芒萁+团叶鳞始蕨 <i>Pinus massoniana-Melastoma malabathricum-Dicranopteris pedata+Lindsaea orbiculata</i>	Q3
		马尾松-玉叶金花-野雉尾金粉蕨+芒萁 <i>Pinus massoniana-Mussaenda pubescens + Heptapleurum heptaphyllum-Onychium japonicum+Dicranopteris pedata</i>	Q2
		马尾松-老鸦糊+玉叶金花-糙叶藁草+芒 <i>Pinus massoniana-Callicarpa giraldii + Mussaenda pubescens-Carex scabrifolia+Miscanthus sinensis</i>	C1

i: 常绿针阔混交林 Mixed Evergreen Needleleaf and Broadleaf Forest; ii: 常绿针叶林 Evergreen Needleleaf Forest; I: 马尾松+鹅掌柴林 *Pinus massoniana+Heptapleurum heptaphyllum* Forest Alliance; II: 马尾松+杨桐林 *Pinus massoniana+Adinandra millettii* Forest Alliance; III: 马尾松+茶竿竹林 *Pinus massoniana+Pseudosasa amabilis* Forest Alliance; IV: 马尾松+樫木林 *Pinus massoniana+Loropetalum chinense* Forest Alliance; V: 马尾松林 *Pinus massoniana* Forest Alliance

表 5 三都澳 6 个海岛马尾松林植被特征及物种多样性指数

Table 5 The species diversity index and vegetation characteristics of *Pinus massoniana* forest in 6 islands in Sandu Gulf

样方号 Sample No.	层次 Layer	优势种 Dominant species	重要值 Important value/%	数量 No./棵	群落多样性 Species diversity				群落各层次多样性 Diversity of different layers			
					H	D	E	R	H	D	E	R
S1	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	32.22	47	2.06	0.79	0.75	19.3	1.93	0.78	0.70	16
	SL	梔子 <i>G. jasminoides</i>	11.44	28					2.95	0.93	0.84	35
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	49.72	83					1.06	0.59	0.76	4
S2	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	40.44	57	1.53	0.64	0.63	11.4	1.60	0.74	0.70	10
	SL	桃金娘 <i>R. tomentosa</i>	20.55	78					2.32	0.85	0.77	20
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	90.15	109					0.15	0.07	0.22	2
S3	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	30.24	38	2.18	0.85	0.86	17.5	1.86	0.83	0.85	9
	SL	鹅掌柴 <i>H. heptaphyllum</i>	13.56	57					3.20	0.94	0.87	40
	HL	狗脊 <i>W. japonica</i>	31.02	25					1.43	0.74	0.89	5
S4	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	21.80	33	2.04	0.79	0.74	16.5	1.98	0.82	0.75	14
	SL	九节 <i>P. asiatica</i>	13.08	70					2.70	0.90	0.82	27
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	54.80	105					1.19	0.57	0.61	7

续表

样方号 Sample No.	层次 Layer	优势种 Dominant species	重要值 Important value/%	数量 No./棵	群落多样性 Species diversity				群落各层次多样性 Diversity of different layers			
					H	D	E	R	H	D	E	R
S5	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	36.22	54	1.77	0.72	0.72	14.6	1.70	0.77	0.74	10
	SL	豺皮樟 <i>L. rotundifolia</i> var. <i>oblongifolia</i>	17.70	98					2.64	0.89	0.78	30
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	68.75	78					0.64	0.36	0.59	3
S6	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	26.81	65	1.87	0.75	0.61	17.1	1.55	0.71	0.59	14
	SL	桃金娘 <i>R. tomentosa</i>	15.09	36					2.92	0.93	0.51	31
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	49.31	28					1.11	0.60	0.80	4
S7	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	17.46	21	2.00	0.76	0.72	19.0	1.96	0.80	0.71	16
	SL	茶竿竹 <i>P. amabilis</i>	22.35	73					2.81	0.90	0.80	34
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	63.42	31					0.87	0.47	0.63	4
S8	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	34.23	108	1.58	0.64	0.60	13.7	1.67	0.74	0.63	14
	SL	流苏子 <i>C. diffusa</i>	18.46	85					2.38	0.85	0.78	21
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	89.59	47					0.17	0.08	0.25	2
S9	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	30.10	61	1.83	0.70	0.66	17.1	2.18	0.84	0.75	18
	SL	桃金娘 <i>R. tomentosa</i>	22.46	144					2.19	0.79	0.68	25
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	82.10	112					0.42	0.20	0.38	3
S10	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	20.78	36	2.09	0.81	0.77	17.6	1.98	0.82	0.75	14
	SL	秤星树 <i>I. asprella</i>	16.17	10					2.93	0.93	0.85	32
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	54.69	53					1.10	0.62	0.68	5
S11	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	23.99	57	2.27	0.85	0.77	22.1	2.29	0.87	0.74	22
	SL	豺皮樟 <i>L. rotundifolia</i> var. <i>oblongifolia</i>	22.07	87					2.70	0.89	0.77	33
	HL	扇叶铁线蕨 <i>A. flabellulatum</i>	27.01	9					1.55	0.75	0.86	6
S12	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	22.29	36	2.23	0.84	0.76	22.0	2.25	0.87	0.78	18
	SL	马甲菝葜 <i>S. lanceifolia</i>	26.95	94					2.72	0.90	0.75	38
	HL	青绿藁草 <i>C. breviculmis</i>	40.83	27					1.45	0.67	0.70	8
S13	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	31.54	60	2.36	0.86	0.79	25.7	2.31	0.86	0.79	19
	SL	九节 <i>P. asiatica</i>	9.25	80					3.04	0.93	0.78	50
	HL	淡竹叶 <i>L. gracile</i>	33.29	55					1.48	0.74	0.82	6
S14	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	27.43	47	2.29	0.85	0.80	21.0	2.08	0.85	0.81	13
	SL	玉叶金花 <i>M. pubescens</i>	13.44	55					3.16	0.94	0.84	43
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	40.15	35					1.52	0.71	0.73	8
S15	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	44.38	46	2.22	0.79	0.74	22.5	1.87	0.70	0.66	17
	SL	玉叶金花 <i>M. pubescens</i>	12.12	55					3.04	0.93	0.82	40
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	33.12	19					1.85	0.79	0.81	10
S16	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	45.49	57	1.98	0.72	0.70	19.0	1.71	0.66	0.67	13
	SL	印度野牡丹 <i>M. malabathricum</i>	9.08	109					2.93	0.92	0.81	37
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	58.13	75					1.23	0.56	0.63	7
S17	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	33.11	63	2.22	0.84	0.77	20.7	2.03	0.81	0.72	17
	SL	九节 <i>P. asiatica</i>	11.48	75					2.86	0.92	0.79	36
	HL	扇叶铁线蕨 <i>A. flabellulatum</i>	24.91	23					1.71	0.80	0.88	7
S18	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	54.10	128	1.33	0.56	0.58	10.1	1.23	0.57	0.59	8
	SL	桃金娘 <i>R. tomentosa</i>	27.45	146					2.26	0.84	0.77	19
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	86.15	101					0.19	0.09	0.27	2
S19	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	28.26	61	1.98	0.78	0.75	17.4	1.96	0.81	0.72	15
	SL	豺皮樟 <i>L. rotundifolia</i> var. <i>oblongifolia</i>	13.49	48					2.80	0.91	0.81	31
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	59.22	44					0.82	0.50	0.75	3

续表

样方号 Sample No.	层次 Layer	优势种 Dominant species	重要值 Important value/%	数量 No./棵	群落多样性 Species diversity				群落各层次多样性 Diversity of different layers			
					H	D	E	R	H	D	E	R
S20	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	28.17	58	1.83	0.72	0.73	15.7	1.93	0.82	0.78	12
	SL	豺皮樟 <i>L. rotundifolia</i> var. <i>oblongifolia</i>	13.16	42					2.67	0.90	0.79	31
	HL	团叶鳞始蕨 <i>L. orbiculata</i>	88.53	25					0.34	0.19	0.49	2
Q1	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	37.64	63	2.27	0.81	0.73	26.4	1.70	0.72	0.66	13
	SL	豺皮樟 <i>L. rotundifolia</i> var. <i>oblongifolia</i>	10.25	140					3.19	0.93	0.80	55
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	27.63	45					2.29	0.87	0.81	17
Q2	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	55.02	58	2.10	0.73	0.71	24.3	1.23	0.54	0.56	9
	SL	玉叶金花 <i>M. pubescens</i>	10.60	49					3.28	0.94	0.81	56
	HL	野雄尾金粉蕨 <i>O. japonicum</i>	18.97	20					2.50	0.91	0.92	15
Q3	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	42.83	53	2.01	0.76	0.66	23.9	1.26	0.61	0.52	11
	SL	印度野牡丹 <i>M. malabathricum</i>	22.21	146					3.03	0.92	0.77	52
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	18.96	19					2.34	0.88	0.86	14
Q4	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	37.62	50	2.30	0.81	0.73	26.8	2.07	0.77	0.73	17
	SL	鹅掌柴 <i>H. heptaphyllum</i>	28.93	224					2.79	0.85	0.71	51
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	32.42	41					2.04	0.81	0.75	15
Q5	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	33.25	53	2.24	0.85	0.79	22.6	1.96	0.81	0.79	12
	SL	九节 <i>P. asiatica</i>	14.41	237					2.74	0.90	0.71	48
	HL	青绿藁草 <i>C. breviculmis</i>	14.87	10					2.20	0.87	0.89	11
Q6	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	41.25	79	2.09	0.76	0.70	24.4	1.69	0.69	0.63	15
	SL	鹅掌柴 <i>H. heptaphyllum</i>	9.67	150					3.09	0.92	0.79	51
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	51.97	51					1.57	0.71	0.76	8
C1	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	61.58	57	1.86	0.63	0.63	20.6	0.78	0.34	0.38	8
	SL	老鸦糊 <i>C. giraldii</i>	6.64	65					3.43	0.96	0.87	48
	HL	糙叶藁草 <i>C. scabrifolia</i>	17.51	30					2.18	0.87	0.91	11
C2	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	31.76	88	1.82	0.76	0.72	16.0	1.74	0.77	0.66	14
	SL	欏木 <i>L. chinense</i>	18.23	86					2.54	0.89	0.75	28
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	63.42	44					0.93	0.55	0.84	3
C3	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	28.80	100	1.93	0.74	0.69	19.4	2.13	0.83	0.72	19
	SL	红鳞蒲桃 <i>S. hancei</i>	13.62	805					2.46	0.85	0.72	31
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	78.97	79					0.65	0.37	0.59	3
C4	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	31.69	67	1.79	0.73	0.70	14.5	1.91	0.80	0.75	13
	SL	桃金娘 <i>R. tomentosa</i>	22.62	155					2.31	0.84	0.73	24
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	69.84	89					0.71	0.38	0.51	4
C5	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	51.60	56	1.74	0.67	0.64	18.8	1.32	0.61	0.63	8
	SL	印度野牡丹 <i>M. malabathricum</i>	11.67	138					2.99	0.92	0.79	44
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	59.79	121					0.91	0.45	0.44	8
J1	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	33.99	52	2.20	0.82	0.76	25.3	1.72	0.77	0.75	10
	SL	鹅掌柴 <i>H. heptaphyllum</i>	18.92	235					3.18	0.92	0.78	59
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	30.17	40					1.92	0.77	0.75	13
J2	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	26.59	65	2.35	0.84	0.76	28.0	1.98	0.79	0.68	18
	SL	欏木 <i>L. chinense</i>	12.59	77					3.32	0.95	0.82	58
	HL	芒 <i>M. sinensis</i>	21.61	10					1.82	0.82	0.88	8
J3	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	30.16	32	2.24	0.81	0.73	27.8	1.94	0.80	0.75	13
	SL	鹅掌柴 <i>H. heptaphyllum</i>	13.71	229					3.19	0.90	0.77	63
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	41.57	79					1.57	0.68	0.63	12

续表

样方号 Sample No.	层次 Layer	优势种 Dominant species	重要值 Important value/%	数量 No./棵	群落多样性 Species diversity				群落各层次多样性 Diversity of different layers			
					H	D	E	R	H	D	E	R
J4	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	31.70	72	2.27	0.82	0.70	29.8	1.88	0.76	0.64	19
	SL	鹅掌柴 <i>H. heptaphyllum</i>	12.63	207					3.10	0.92	0.76	59
	HL	团叶鳞始蕨 <i>L. orbiculata</i>	17.81	18					1.98	0.83	0.77	13
B1	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	33.75	53	2.38	0.85	0.77	29.6	2.38	0.85	0.78	21
	SL	九节 <i>P. asiatica</i>	12.36	300					2.84	0.89	0.70	59
	HL	黑莎草 <i>G. tristis</i>	28.32	13					1.67	0.79	0.86	7
B2	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	26.27	49	2.13	0.77	0.70	26.8	1.86	0.74	0.66	17
	SL	玉叶金花 <i>M. pubescens</i>	11.31	62					3.16	0.93	0.78	57
	HL	芒萁 <i>D. pedata</i>	55.97	33					1.24	0.61	0.69	6
B3	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	43.43	97	1.96	0.75	0.72	18.9	1.85	0.74	0.72	13
	SL	鹅掌柴 <i>H. heptaphyllum</i>	10.63	115					2.75	0.90	0.76	38
	HL	团叶鳞始蕨 <i>L. orbiculata</i>	46.95	73					1.06	0.54	0.66	5
D1	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	42.57	122	1.94	0.75	0.67	23.5	1.63	0.68	0.62	14
	SL	鹅掌柴 <i>H. heptaphyllum</i>	31.86	417					2.67	0.87	0.69	49
	HL	山麦冬 <i>L. spicata</i>	25.85	28					1.64	0.74	0.75	9
D2	TL	马尾松 <i>P. massoniana</i>	37.01	78	2.07	0.79	0.69	26.1	1.60	0.72	0.64	12
	SL	鹅掌柴 <i>H. heptaphyllum</i>	21.03	397					2.82	0.88	0.70	57
	HL	芒 <i>M. sinensis</i>	18.73	36					2.13	0.84	0.79	15

TL:乔木层 Tree layer;SL:灌木层 Shrub layer;HL:草本层 Herb layer;H;Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index;D;Simpson 指数 Simpson index;E;Pielou 指数 Pielou index;R;Patrick 指数 Patrick index

对 40 个样方的物种多样性指数(含群落整体和各层片的 Patrick 指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数,见表 5)和 14 个环境因子(含表 2 的 9 个土壤因子、表 1 的 4 个地形因子(海拔、坡向、坡度、坡位)和群落郁闭度)进行冗余分析(RDA)分析,结果见图 3。分析结果筛选出 2 个显著影响($P < 0.05$)物种多样性的环境因子:土壤 pH 和速效钾(AK)。土壤 pH 与群落 Patrick 指数、Shannon-Wiener 指数及灌草层物种多样性指数呈正相关,与群落 Pielou 指数、Simpson 指数及乔木层物种多样性指数呈负相关;速效钾与群落整体、乔木层、灌木层和草本层的物种多样性指数均呈正相关。而土壤 pH 和速效钾这两个环境因子共同对物种多样性的总解释量为 27.6%,表明还有 72.4%的未知因素影响了三都澳海岛的马尾松群落物种多样性。

鹅掌柴是研究地灌木层重要值最大的物种,属半阳树种,能于全日照、半日照、半荫庇的环境中生存,以半阳或者半阴的环境生长最佳。由于 RDA 分析反映的是线性回归分析结果,不能反映出非线性相关模型,因此对灌木层鹅掌柴的重要值与群落郁闭度进行二次函数拟合(剔除群落中未出现鹅掌柴的 4 个样方 S2、S6、S8、S18),结果见图 4。可知,灌木层鹅掌柴的重要值与群落郁闭度符合二次函数关系,二者呈显著($P < 0.05$)相关关系。当郁闭度过高或者过低时,鹅掌柴的重要值均占比极小,符合鹅掌柴对光照的适应性结果。

3 结论与讨论

3.1 三都澳 6 个海岛马尾松群落分类和演替

在前人的研究中发现,自然或近自然的亚热带森林植被以中型和小型高位芽植物占比为主,一年生植物相对较少,而次生群落则表现出灌木和(一年生)草本植物占比优势明显,高位芽植物生态位丧失^[9,24-25]。本研究区以小型、矮小型和中型高位芽植物为主,一年生植物占比极小,乔木树种占比最大,表现为近自然状态的植被类型,而矮小型高位芽植物占比大可能是受海岛环境影响,植物的适应性选择^[10]。但生境异质性会导致同一植物物种表现为不同的生活形态^[10],受海岛环境的限制与影响,研究区内的大型高位芽植物种类占比最小,研究地记录的最高物种为马尾松,属于大型高位芽植物(30m以上),但群落中最高统计记录不超过

表 6 不同群系的物种多样性指数

Table 6 Species diversity index of different formations

群系 Formations	乔木层 Tree layer			灌木层 Shrub layer			草本层 Herb layer			群落多样性 Species diversity						
	H	D	E	H	D	E	H	D	E	H	D	E	R			
I	1.92a±0.25	0.79a±0.06	0.71a±0.06	15.1a±4.1	2.95a±0.23	0.91a±0.02	0.77a±0.04	48.9a±13.9	1.76a±0.38	0.75a±0.10	0.74a±0.09	11.4a±4.0	2.20a±0.09	0.82a±0.02	0.75a±0.03	24.5a±4.2
II	1.87a±0.22	0.79a±0.05	0.70a±0.07	14.7a±2.3	2.69a±0.23	0.90a±0.04	0.74a±0.12	29.5b±4.2	0.70b±0.39	0.39b±0.23	0.59a±0.20	3.2c±1.2	1.88b±0.17	0.74b±0.06	0.70a±0.07	16.8b±1.9
III	1.99a±0.08	0.81a±0.04	0.74a±0.06	15.0a±1.7	2.97a±0.18	0.92a±0.02	0.83a±0.02	37.3a±4.9	1.15a±0.33	0.59a±0.12	0.71a±0.07	5.3b±2.3	2.12a±0.15	0.80a±0.05	0.77a±0.04	19.8a±1.1
IV	1.86a±0.17	0.78a±0.01	0.68a±0.01	16.0a±2.8	2.93a±0.15	0.92a±0.04	0.79a±0.05	43.0a±21.2	1.38a±0.63	0.69a±0.19	0.86a±0.03	5.5b±3.5	2.08a±0.37	0.80a±0.06	0.75a±0.03	22.0a±8.5
V	1.73a±0.40	0.71a±0.13	0.68a±0.11	13.3a±4.0	2.84a±0.35	0.90a±0.04	0.77a±0.05	41.6a±12.3	1.39a±0.70	0.62a±0.26	0.69a±0.21	7.5b±4.0	2.00b±0.27	0.75b±0.08	0.70a±0.07	20.6a±5.2

同列不同字母代表物种多样性指数差异显著(P<0.05)

表 7 不同植被型的物种多样性指数

Table 7 Species diversity index of different vegetation types

植被型 Vegetation types	乔木层 Tree layer			灌木层 Shrub layer			草本层 Herb layer			群落多样性 Species diversity						
	H	D	E	H	D	E	H	D	E	H	D	E	R			
i	1.91a±0.20	0.79a±0.05	0.71a±0.06	15.2a±3.0	2.89a±0.27	0.91a±0.03	0.78a±0.07	39.7a±13.5	1.25a±0.59	0.61a±0.22	0.73a±0.15	6.4a±4.7	2.07a±0.20	0.79a±0.05	0.75a±0.05	20.8a±4.9
ii	1.73a±0.40	0.71b±0.13	0.68a±0.11	13.3a±4.0	2.84a±0.35	0.90a±0.04	0.77a±0.05	41.6a±12.3	1.39a±0.70	0.62a±0.26	0.69a±0.21	7.5a±4.0	2.00a±0.27	0.75a±0.08	0.70b±0.07	20.6a±5.2

25 m, 计算其平均高度仅 10 m 左右, 且本研究地记录的 95 种乔木树种中, 乔木层仅见 81 种, 其他 14 种以灌木状分布于灌木层, 具体体现为灌木层多样性指数(除 *E* 外)均明显高于乔木层(表 5、6 和 7), 表现出了次生群落的特征。因此, 可以将研究地的植被类型划分为具次生性质的自然植被, 或称之为半自然植被^[26]。

出现在乔木层的竹类、大型灌木、附生植物和藤本植物是乔木层中稳定的组成成分, 因此要统计为该层的物种, 而根据需求, 乔木层可进一步划分为大乔木层(高度 ≥ 25 m)、中乔木层(8 m ≤ 高度 < 25 m)和小乔木层(5 m ≤ 高度 < 8 m) 3 个亚层^[13]。研究地记录的最高物种为马尾松, 高度未超过 25 m, 且计算每个样方的物种平均高度发现, 马尾松平均高度 9.1—12 m 不等, 而乔木层中重要值较高的鹅掌柴、杨桐、茶竿竹、欆木平均高度为 5.5—7.5 m 不等, 乔木层几种优势植物平均高度差异不明显, 从实际生长高度来看都属于中小型乔木, 因此乔木层不做进一步划分。根据各群落中物种重要值的组平均聚类, 将马尾松群落划分为 5 类群系, 分属于 2 种植被型(见图 2 和表 5)。由于灌木层结构复杂, 且部分样方的灌木层和草本层优势种不明显, 表现出同一层片多优势种共存的现象, 符合亚热带群落结构和物种组成复杂多样的特征^[13], 因此最终划分为 33 类群丛(见表 5)。5 类马尾松群落类型中, 乔木层重要值最高的都是马尾松, 是绝对优势树种。大多数样方草本层重要值较高的物种较为相似, 以芒萁重要值占比较大, 表明三都澳海岛马尾松群落林下草本层重要值较高的物种种类受林分类型影响不大, 但不同林分类型中, 林下灌木层各物种重要值存在较大差异, 这与张维伟等^[27]的研究结果类似。在群落中, 物种之间的相互作用会影响群落的物种组成及其个体数量^[28], 同时外界的干扰也会导致物种组成差异^[29]。由图 4 可知, 当群落郁闭度过高或者过低时, 鹅掌柴重要值均较小。根据重要值数据, 在 S10—12、S19 和 C2—3 这 6 个郁闭度 > 0.85 的样方中, 灌木层中鹅掌柴的重要值仅有 5.28、1.32、3.82、0.57、0.72 和 0.54, 鹅掌柴属半阳树种, 以半日照或者半阴环境生长最好, 过高的林分密度则不利于鹅掌柴的生长。在 S11—12 两个马尾松-鹅掌柴混交林中, 鹅掌柴虽在乔木层占据极大的重要值, 但在高郁闭度的林下灌木层仍然难以生存, 长此以往, 这些样方的鹅掌柴将逐渐被其他物种淘汰, 使得林分结构发生改变, 群落稳定性受到影响。同理, 马尾松属阳性植物, 在灌木层仅在 S9 和 C5 两个极低郁闭度的马尾松林中出现, 在林分结构复杂且郁闭度过高的群落中明显存在自然更新问题。因此, 本研究 5 种类型马尾松群落灌木层之所以出现物种组成及其重要值差异, 原因之一极可能是受郁闭度的影响。

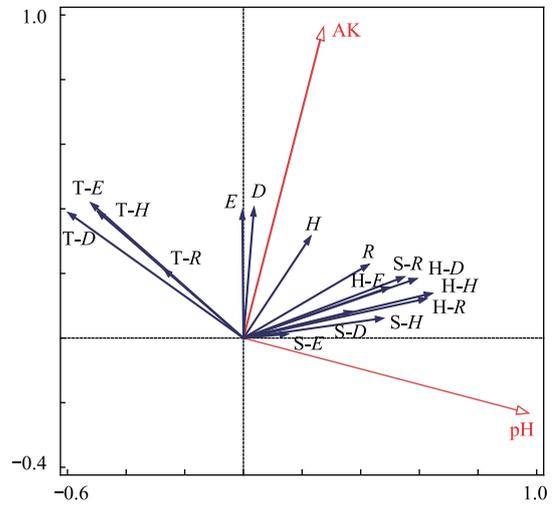


图 3 物种多样性指数与环境因子 RDA 分析图

Fig.3 Redundancy analysis (RDA) analysis diagram of species diversity index with environmental factors

H: 群落 Shannon-Wiener 指数; *D*: 群落 Simpson 指数; *E*: 群落 Pielou 指数; *R*: 群落 Patrick 指数; *T-H*: 乔木层 Shannon-Wiener 指数; *T-D*: 乔木层 Simpson 指数; *T-E*: 乔木层 Pielou 指数; *T-R*: 乔木层 Patrick 指数; *S-H*: 灌木层 Shannon-Wiener 指数; *S-D*: 灌木层 Simpson 指数; *S-E*: 灌木层 Pielou 指数; *S-R*: 灌木层 Patrick 指数; *H-H*: 草本层 Shannon-Wiener 指数; *H-D*: 草本层 Simpson 指数; *H-E*: 草本层 Pielou 指数; *H-R*: 草本层 Patrick 指数

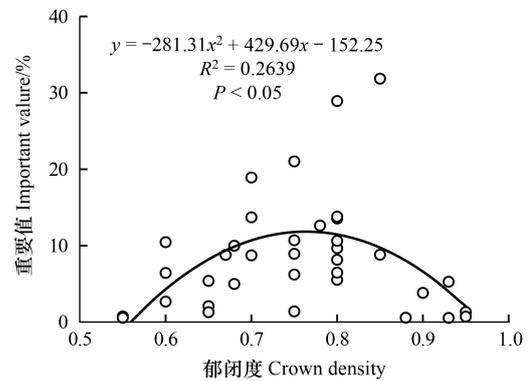


图 4 鹅掌柴重要值与群落郁闭度二次函数拟合

Fig.4 The quadratic function of *Heptapleurum heptaphyllum* important value and community crown density

在 S11—12 两个马尾松-鹅掌柴混交林中, 鹅掌柴虽在乔木层占据极大的重要值, 但在高郁闭度的林下灌木层仍然难以生存, 长此以往, 这些样方的鹅掌柴将逐渐被其他物种淘汰, 使得林分结构发生改变, 群落稳定性受到影响。同理, 马尾松属阳性植物, 在灌木层仅在 S9 和 C5 两个极低郁闭度的马尾松林中出现, 在林分结构复杂且郁闭度过高的群落中明显存在自然更新问题。因此, 本研究 5 种类型马尾松群落灌木层之所以出现物种组成及其重要值差异, 原因之一极可能是受郁闭度的影响。

从演替方向看,研究地以人工马尾松常绿针叶林作为起点,起初受人为砍伐破坏的影响,群落演替速度较慢,后经当地政策的干预,人为干扰逐渐减弱,在群落恢复过程中表现出次生性质。随着时间的推移,群落正逐渐恢复至近自然状态,但是目前仍然存在次生群落的特征。群落由常绿针叶林逐步向常绿针阔叶混交林演替的过程中,强阳性针叶树种马尾松将逐步被其他阳性阔叶树种取代,如鹅掌柴、杨桐等,阔叶树种将逐渐占据群落的主要地位,群落郁闭度也将逐渐增加。当郁闭度高达一定的程度时,不耐荫蔽的阔叶树种如鹅掌柴等,在高郁闭度的林下将难以生存,自然更新能力下降,生态位逐渐降低,将被逐步淘汰,而强耐阴的阳性树种如杨桐等,将逐步成为该区域稳定群落的优势种或建群种。最终,研究地群落将自然演替为亚热带顶级群落-常绿阔叶林,同时针叶林林下草本层最主要优势种芒萁也将随着群落从针叶林向阔叶林的演替而逐渐丧失优势地位。

3.2 三都澳 6 个海岛马尾松群落物种多样性特征及环境因子解释

Shannon-Wiener 指数(H)越高,群落越复杂,生物种类越多;Simpson 指数(D)越大,群落内物种数量分布越不均匀^[7]。本研究,不同林分类型物种多样性有所不同,总体而言,马尾松林的群落整体 H 、 D 均显著 ($P < 0.05$) 低于除 II 外的其他混交林(表 6)。主要原因是,混交林中乔木层植物种类多,生态位差异大,对资源利用更充分^[27]。而单一马尾松林乔木层形成的单一胁迫,会降低林下植物的数量,进而影响其物种多样性指数,且植物数量的减少难以提供足够的凋落物供给微生物分解,使得马尾松林内的生境条件比其他混交林差,进一步降低了物种多样性指数。同时,根据表 2 土壤数据可知,速效钾含量最高的 10 个样方中,除 C4 属于马尾松林外,其他都是混交林,从 RDA 分析结果也发现,速效钾与各层片物种多样性指数均呈正相关性,随着植物生长所必需的营养元素含量的增加,使得各层片植物能获取的营养更多,多种植物生长状况越好,群落就越复杂,从而逐渐导致优势种的地位越下降,最终群落表现出各层片多个优势种共存的现象。反之,各层片营养物质匮乏,能够适应最低限度的营养物质的物种才能存活并繁衍,各层片的优势种明显,占据着群落分布中的优势地位,因此,较之混交林,马尾松针叶林各层片的结构表现就更为简单,从而导致其群落整体 H 、 D 均显著 ($P < 0.05$) 低于除 II 外的其他混交林群系。何雅琴等^[9]对大练岛的森林群落多样性研究也表明,台湾相思+木麻黄林的群落整体 H 、 D 均显著 ($P < 0.05$) 高于台湾相思林和木麻黄林。表明混交林较于纯林,更能增加群落的生物种类,并提高 Shannon-Wiener 和 Simpson 指数的大小。

Pielou 指数(E)越高,植物群落结构越稳定^[30]。本研究地马尾松常绿针阔混交林群落整体 E 值显著 ($P < 0.05$) 高于马尾松常绿针叶林(表 7),与大练岛^[9]的方差分析比较结果也表明,大练岛的台湾相思林和台湾相思+木麻黄林的群落整体 E 值显著 ($P < 0.05$) 高于本研究地的马尾松常绿针叶林,这与群落演替规律相符,群落演替越后期,群落越稳定^[31]。Patrick 指数(R)直接反映群落物种丰富度^[7]。II 群系(马尾松+杨桐林)的灌木层丰富度指数 R 显著 ($P < 0.05$) 低于其它 4 类群系,主要原因可能是,II 群系的 6 个样地郁闭度均较大(0.8, 0.8, 0.85, 0.88, 0.93 和 0.93),研究地有 41 种阳性树种(都为木本植物)和鹅掌柴等不耐荫庇的半阳性树种,鹅掌柴在阳光不足的高郁闭度林下灌木层占比较低,甚至难以存活(图 4),而马尾松林树冠较之更窄,更有利于光照进入林下,使得林下植物,特别是阳性木本植物的丰富度更高。与大练岛^[9]的方差分析比较结果发现,本研究地马尾松林丰富度指数 R 显著 ($P < 0.05$) 高于大练岛的所有森林群落类型(台湾相思林、木麻黄林及 2 种物种的混交林)。引起这一结果的主要原因在于,马尾松林乔木层和灌木层丰富度指数 R 均显著 ($P < 0.05$) 高于大练岛的所有森林群落类型的乔木层和灌木层 R 值。由于马尾松较于木麻黄和台湾相思,生长高度更高,与其他乔木物种存在较大的高度差,在资源竞争时能形成垂直方向的互补^[32],同时其林冠密度更低,更有利于阳性树种的生长,因此其乔木层物种更丰富;而灌木层计算乔木幼树,因此丰富的乔木层物种也一定程度上促进了灌木层物种的丰富度,因此马尾松林乔木层指数 R 更高。但马尾松林草本层指数 R 显著 ($P < 0.05$) 低于大练岛的所有森林群落类型的草本层 R 值。其主要原因在于,马尾松林草本层多以芒萁为优势物种,芒萁对杂草密度、种子萌发和幼苗生长的具有化感效应^[33-34],严重减少了草本层物种,同时,竹类在马尾松林乔木层、灌木层均分布较广,导致草本层光照严重不足,且竹类的凋落物也降低了草本植物的生存空

间^[35],因此导致马尾松林草本层 R 指数最低。I 群系(马尾松+鹅掌柴林)的草本层 R 值均显著($P<0.05$)高于本研究的其他群系,II 群系的草本层 H 、 D 、 R 均显著($P<0.05$)低于其他 4 类群系,主要原因是 II 群系所有样方草本层均以芒萁为单一优势种,III—V 群系的草本层也以芒萁作为优势种居多,但 I 群系有一半的样方草本层优势种不是芒萁,以芒萁作为优势种的 Q1、J1 样方芒萁的重要值不高,没有形成致密层。芒萁在林下形成致密层时会大量截留林冠乔木的凋落物,进而影响其凋落物分解和养分循环过程^[36],加之芒萁具有化感效应^[33-34],因此抑制了草本层其他物种的生长,物种丰富度也大大降低。同时,这些样方的土壤 pH 和速效钾较于其他群系样方的更低,土壤 pH 和速效钾与灌草层的物种多样性指数均呈正相关性,pH 过低,植物对大量元素的吸收减弱^[37],而钾含量过低,会降低植物酶的激活、蛋白质的合成和养分的运输等^[38],从而制约了植物的生长发育。而土壤 pH 与乔木层的物种多样性呈负相关性,主要原因可能是乔木层的主要物种如马尾松、鹅掌柴、茶竿竹等都喜欢生活在偏酸的土壤中,因此 pH 越高,越不利于乔木层植物的生长。

4 建议

马尾松混交林相较于马尾松林物种丰富度更高,群落稳定性更强,但相对的,混交林过高的林分郁闭度严重制约了林下灌木层植物的生存环境,物种丰富度明显降低,马尾松、鹅掌柴等建群种的更新受到严重制约,不利于群落的长期稳定发展。因此未来马尾松森林经营中要结合考虑这两个问题,通过人为抚育间伐,促进马尾松林向混交林转换,同时控制林窗面积,增大林内的辐射强度,也通过补植、控制土壤 pH 和速效钾的含量等,促进群落长期稳定发展。

研究地中已见 1 级恶性入侵植物钻叶紫菀和小蓬草 2 种,且在样线踏查时,发现岛上也分布有其他 1 级恶性入侵植物,如假臭草(*Praxelis clematidea*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、马缨丹(*Lantana camara*)等。研究地草本层以芒萁为最高优势种,芒萁的化感效应不仅抑制了恶性入侵植物的入侵,也抑制了草本层一些植物的生长,导致大部分样方草本层多样性指数最低。且芒萁单优草本层片虽然广泛分布于亚热带低山丘陵区的多种退化群落,但消退于常绿阔叶森林群落。若芒萁消退,对入侵植物的化感作用也将减少,而 1 级恶性入侵植物的入侵性极强,会严重威胁本土植物的生态位,因此需要通过人为干预手段控制林下芒萁密度,既能增加草本层物种丰富度,也能有效抑制入侵植物的扩散。

研究地分布有国家一级保护植物野生建兰(*Cymbidium ensifolium*)、国家二级保护植物野生茶(*Camellia sinensis*)和花榈木(*Ormosia henryi*),在对研究地进行人为抚育时,应注意加强对这些植物的保护力度,防止人为采摘、毁坏,必要时应采取圈地、引种等保护手段。

参考文献(References):

- [1] 池源,石洪华,郭振,丁德文. 海岛生态脆弱性的内涵、特征及成因探析. 海洋学报, 2015, 37(12): 93-105.
- [2] 池源,郭振,石洪华,高莉媛. 北长山岛人工林健康状况评价. 生态科学, 2017, 36(1): 215-223.
- [3] 王晓丽,王媛,石洪华,彭士涛,宫立鹏,覃雪波. 山东省长岛县南长山岛黑松和刺槐人工林的碳储量. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1263-1268.
- [4] 龚艳宾. 天然阔叶红松林下植被物种多样性及生物量研究[D]. 北京:北京林业大学, 2016.
- [5] 张琳婷,姜德刚,刘建辉,王睿馨. 基于光合特性的海岛植被修复适生植物的筛选. 应用海洋学学报, 2021, 40(3): 428-436.
- [6] (Lisa) Langer E R, Steward G A, Kimberley M O. Vegetation structure, composition and effect of pine plantation harvesting on riparian buffers in New Zealand. Forest Ecology and Management, 2008, 256(5): 949-957.
- [7] 张建宇,王文杰,杜红居,仲召亮,肖路,周伟,张波,王洪元. 大兴安岭呼中地区 3 种林分的群落特征、物种多样性差异及其耦合关系. 生态学报, 2018, 38(13): 4684-4693.
- [8] Hattermann D, Bernhardt-Römermann M, Otte A, Eckstein R L. New insights into island vegetation composition and species diversity-Consistent and conditional responses across contrasting insular habitats at the plot-scale. PLoS One, 2018, 13(7): e0200191.
- [9] 何雅琴,曾纪毅,陈国杰,肖集泓,邓传远. 福建平潭大练岛典型森林群落特征及物种多样性. 应用与环境生物学报, 2022, 28(3): 759-769.

- [10] 张坚强. 海坛岛次生植被物种多样性与群落特征[D]. 福州: 福建农林大学, 2019.
- [11] 申琳. 福建东冲半岛及其周围岛屿苔藓植物多样性及其生物地理学研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2020.
- [12] 崔宁洁, 陈小红, 刘洋, 张健, 杨万勤. 不同林龄马尾松人工林林下灌木和草本多样性. 生态学报, 2014, 34(15): 4313-4323.
- [13] 王国宏, 方精云, 郭柯, 谢宗强, 唐志尧, 沈泽昊, 王仁卿, 王襄平, 王德利, 强胜, 于丹, 彭少麟, 达良俊, 刘庆, 梁存柱. 《中国植被志》研编内容与规范. 植物生态学报, 2020, 44(2): 128-178.
- [14] 李梁, 张建军, 陈宝强, 冯换成, 张守红, 孙若修, 高思远, 张海博, 印家齐. 晋西黄土区长期封禁小流域植被群落动态变化. 林业科学, 2018, 54(2): 1-9.
- [15] 祁有祥, 骆汉, 赵廷宁. 郁闭度简易测量方法试验研究. 林业实用技术, 2009(11): 62-63.
- [16] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 2006.
- [17] 福建植物志编辑委员会. 福建植物志. 福州: 科学技术出版社, 1982.
- [18] 李广良, 丛静, 卢慧, 薛亚东, 宿秀江, 杨敬元, 李迪强. 神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序. 生态学报, 2012, 32(23): 7501-7511.
- [19] 张金屯. 数量生态学(第三版). 北京: 科学出版社, 2018.
- [20] 李建, 李晓宇, 曹静, 谭凌照, 赵秀海. 长白山次生针阔混交林群落结构特征及群落动态. 生态学报, 2020, 40(4): 1195-1206.
- [21] 李军玲, 张金屯. 太行山中段植物群落物种多样性与环境的关系. 应用与环境生物学报, 2006, 12(6): 766-771.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [23] 王梅岷. 中国亚热带常绿阔叶林生活型的研究. 生态学杂志, 1987, 6(2): 21-23, 17.
- [24] 易慧琳. 南亚热带季风常绿阔叶林群落结构及其对构建“近自然群落”的启示[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2016.
- [25] 安树青, 赵儒林. 中国北亚热带次生森林植被的特征分析. 南京大学学报: 自然科学版, 1991, 27(2): 323-331.
- [26] 阎恩荣. 普陀山植被: 类型、结构、功能、管护. 北京: 科学出版社, 2017.
- [27] 张维伟, 薛文艳, 杨斌, 赵忠. 桥山栎林群落结构特征与物种多样性相关关系分析. 生态学报, 2019, 39(11): 3991-4001.
- [28] 毛志宏, 朱教君. 干扰对植物群落物种组成及多样性的影响. 生态学报, 2006, 26(8): 2695-2701.
- [29] 边巴多吉, 郭泉水, 次柏, 罗大庆. 西藏冷杉原始林林隙对草本植物和灌木树种多样性的影响. 应用生态学报, 2004, 15(2): 191-194.
- [30] Hillebrand H, Bennett D M, Cadotte M W. Consequences of dominance: a review of evenness effects on local and regional ecosystem processes. Ecology, 2008, 89(6): 1510-1520.
- [31] 刘润红, 白金连, 包含, 农娟丽, 赵佳佳, 姜勇, 梁士楚, 李月娟. 桂林岩溶石山青冈群落主要木本植物功能性状变异与关联. 植物生态学报, 2020, 44(8): 828-841.
- [32] 周刘丽, 张晴晴, 赵延涛, 许滔山, 程浚洋, 朱丹妮, 宋彦君, 黄海侠, 史青茹, 阎恩荣. 浙江天童枫香树群落不同垂直层次物种间的联结性与相关性. 植物生态学报, 2015, 39(12): 1136-1145.
- [33] TET-VUN C, Ismail B S. Field evidence of the allelopathic properties of *Dicranopteris linearis*. Weed Biology and Management, 2006, 6(2): 59-67.
- [34] Lim C J, Basri M, Ee G C L, Omar D. Phytoinhibitory activities and extraction optimization of potent invasive plants as eco-friendly weed suppressant against *Echinochloa colona* (L.) Link. Industrial Crops and Products, 2017, 100: 19-34.
- [35] 王永健, 陶建平, 李媛, 余小红, 席一. 华西箭竹对卧龙亚高山森林不同演替阶段物种多样性与乔木更新的影响. 林业科学, 2007, 43(2): 1-7.
- [36] Yang L, Wang J, Huang Y H, Hui D F, Wen M L. Effects of the interception of litterfall by the understorey on carbon cycling in eucalyptus plantations of South China. PLoS One, 2014, 9(6): e100464.
- [37] 刘冠成, 黄雅曦, 王庆贵, 邢亚娟. 环境因子对植物物种多样性的影响研究进展. 中国农学通报, 2018, 34(13): 83-89.
- [38] 沈瑞芝. 钾对植物的生理作用. 上海农业科技, 1982(5): 32-34.